

欧美国家能源领域的区块链技术应用现状

陈浩¹,李雅超²,丁羽¹,王蓓蓓²

(1. 江苏省电力交易中心有限公司,南京 210008;2. 东南大学 电气工程学院,南京 210096)

Application status of blockchain technology in European and American energy field

CHEN Hao¹, LI Yachao², DING Yu¹, WANG Beibei²

(1. Jiangsu Power Exchange Center Co., Ltd., Nanjing 210008, China; 2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

摘要:为了协调电力供需、解决能源供应商与需求方交易的信任问题,区块链作为一种具有去中心化、公开透明、不可篡改等特性的互联网技术,逐渐被视作一种有效的能源交易支撑手段。在此背景下,分析了区块链技术应用至能源领域的可行性,总结欧美国家现有的应用工程场景,讨论区块链应用至能源领域面临的挑战以及亟待解决的问题,并结合国内政策以及能源发展现状,对区块链技术应用至我国能源建设的前景进行了展望。

关键词:区块链;能源领域;微电网

Abstract: In order to coordinate power supply and demand and solve the trust problem between energy suppliers and customers, as an Internet technology featuring decentralization, openness, transparency and non-tampering, blockchain has gradually been regarded as an effective mean to support energy transactions. Under this background, the feasibility of blockchain technology's application to the energy sector is analyzed, existing application engineering scenarios in European and American countries are summarized and blockchain application to energy challenges and problems are discussed. Considering the domestic policy and present energy development situation, the prospect of blockchain technology application to our country energy sector is discussed.

Key words: blockchain; energy field; micro-grid

中图分类号:TM73;TK018 文献标志码:B

0 引言

随着经济发展、技术进步以及社会对高效、清洁、低碳能源的需求越来越多,电力生产方逐渐由传统的火电厂向以风能和光伏为代表的分布式可再生能源发电厂过渡,能源市场中涌现出大量产消者^[1],用户获得了更多购买选择。而由于分布式能源出力具有随机性、间歇性和波动性等特征,其电力并网时给电网安全经济运行带来越来越大的压力^[2],使得“弃风”、“弃光”与限电的矛盾日益突出^[3],加之能源互联网的发展,电、热、气等多种能源的协调互补成为能源综合利用的趋势,各种信息流、能量流的融合,大大增加了电力公司对市场主体以及交易过程的管理难度。

区块链作为一种具有开放、分散、透明、不可篡改等特性的新型计算机技术,应用到能源领域时,无需三方机构(如配网运营商)即可协调管理发电商以及用户发用电需求,并且可以保证能源交易的安全性,降低了交易成本和管理成本^[4]。同时区块链平台上的代币可以实现不同种类的能源(电、热等)之间的自由交易。总而言之,区块链的特性及功能与分布式能源的交易

需求相契合,两者结合在理论研究以及工程实践方面都已有丰富的成果。在理论研究方面,已有诸多学者研究了将区块链应用至能源交易、辅助服务、电动汽车充放电、信息交互安全、清洁能源认证^[5-9]等方面的可行性,以及对能源交易效率的影响^[10]。在政府支持、能源企业以及科技公司合作的情况下,已有一部分基于区块链的能源科技项目落地运行。

考虑到区块链在能源领域的应用尚处于初始阶段,本文主要总结国外基于区块链技术的能源工程实践经验,结合国内政策以及能源发展现状,对中国能源发展过程中如何结合区块链提出一定建议,以期最大化发挥分布式能源以及区块链的功能,实现能源高效利用。

1 区块链原理

1.1 区块链概念及优势

作为一种分布式数据库,区块链将一段时间内的全网数据打包成区块并按照时间顺序相连,现已在金融、股票、投票等领域得到应用^[5]。与传统数据库相比,区块链具有以下两点主要优势:借助共识机制以及默克树等,保证存储在区块链平台中的数据公开可查并且难以被篡改;将简单的操作步骤写成智能合约,以计算机程序的形式约定合约双方的权利和义务,当满足一定的条件时,操作自动执行,无

收稿日期:2019-07-28;修回日期:2019-08-29

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019036)

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (No. J2019036)

需第三方介入,降低了交易成本和监管成本。

1.2 区块链与能源交易结合优势

随着能源互联网的发展,各种分布式能源供应商参与到市场竞争中已成为一种趋势,区块链理念与多类型的分布式能源参与市场交易的需求高度契合:一方面,区块链的本质是分布式账本,可以实现大量用户直接进行点对点交易,这为新兴的众多分布式能源发电商加入市场提供了技术支持;另一方面,各种交易规则可以用程序编写并封装成智能合约部署在区块链上,使得各种决策可及时高效地执行,保障收益的公平分配。

2 能源领域的区块链应用

由于去中心化、去信任等特性,在无需第三方监管的条件下,区块链可以自发实现买卖双方的交易。既降低了信任成本,也节约了监管的成本。目前部分欧美国家已经尝试将区块链应用至能源领域,相关的典型项目整理如下。

2.1 光伏电力

随着国家能源局出台《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》^[11],诸多学者探讨了借助区块链实现分布式能源电力交易的可行性及具体执行方案。目前在电力行业与区块链结合最典型、应用最多的就是分布式光伏电力,典型的基于区块链的光伏发电平台如表1所示。其中2个典型的项目内容如下。

表1 基于区块链的典型光伏发电平台
Table 1 Typical photovoltaic power generation platform based on blockchain

项目名称	项目内容
IDEO CoLab 太阳能电池板	软件公司 IDEO CoLab 与和物联网公司 Filament 合作研发设计的基于区块链技术、与互联网连接的太阳能电池板设备,可追踪记录发电量。
ACWA Power 太阳币	沙特阿拉伯公用事业公司 ACWA Power 计划采用太阳币,光伏发电商每生产 1 MW 的清洁电力,通过区块链平台认证后即可获得 1 个太阳币的奖励,从而激励发电商生产光伏电力,促进清洁能源的利用。
非洲 Sun Exchange 项目	借助区块链平台向全球众筹资金来建立非洲光伏发电系统,并租赁给地方机构。既充分利用非洲的光照资源来缓解电力短缺问题,又扶持当地的经济的发展。
Global Grid 项目	位于西班牙的 Global Grid 项目致力于将区块链及智能合约应用至光伏电力生产、传输、出售等多个环节,除了实现生产方与用户直接交易来降低成本之外,投资者能够通过该平台为光伏发电建设提供资金,降低了工程初期建设时的融资难度。

2.1.1 布鲁克林微电网项目

布鲁克林微电网是由 Transactive Grid 公司运营的基于区块链的 P2P 能源交易平台^[12],基于智能合约和拜占庭共识算法,产消者可以将剩余能源直接卖给

邻居。多余的能量由专门设计的智能电能表测量,转换成等价的能量令牌用于社区市场的交易,通过区块链技术从产消者的钱包转移到终端消费者。

未来该平台的用户不仅可以根据自己的价格偏好,还可以根据其他环境或社会价值的标准,决定向谁购买/出售能源令牌。例如,消费者可以指明其可以在本地生产的可再生能源上支付最高价格,也可以声明其他偏好,例如愿意从本地可再生能源或主网购买的能源占比,或者是优先从朋友、家人或某个邻居那里购买能源。

2.1.2 Power Ledger 项目

目前拥有太阳能电池板的用户生产出的电力在满足自身需求的基础上,多余的电力会存储在蓄电池中,或者是卖给电力公司。前者的储能装置成本较高,而后者使得电力公司对电能有着绝对的主导权,在一定程度上会影响到产消者的利益。

澳大利亚能源公司 Power Ledger 与软件公司 Ledger Assets 合作创建了太阳能剩余电力交易的平台^[13],通过智能合约实现发电商和用户的直接交易,无需经由电力公司。产消者可以将剩余电力以比电力公司回购价格高的电价出售,用户也可以用比零售价低的价格购买到电力。这种方式提高了用户和小型分布式能源发电商的利益、降低了对主网的依赖,从而鼓励了分布式能源发电。

2.2 区域供热

鹿特丹区块链技术实验室计划开发区块链应用程序以进行热能交易^[14]。首先区域内用户需要与供热公司签订合同,并写成智能合约的形式部署在区块链上。当到供暖期时,供热公司需供暖并维持室内温度,室内的温控设备(热量表)与区块链相连,当室内温度低于一定阈值或者未能及时供暖,智能合约自动执行对供热公司的违约惩罚。若用户未缴纳约定的供暖费用,温控设备自动停止对该家庭的供热直到缴纳热力费用和滞纳金为止。同时对于正常供热取暖的情况,智能合约会定期自动从用户账户转移使用热量对应的费用到供热公司的账户中。

2.3 石油

虽然世界各国都在大力推进可再生能源发展,但石油仍然是目前使用最多的能源之一。石油产业作为世界上最大的工业之一仍然面临着物流传输以及信息存储等问题。石油公司会采用专门的中心化系统来跟踪油桶、管理记录信息等,中心化的系统既需要高额的管理成本,又需要为了预防黑客攻击而付出较多的系统维护成本。针对这种情况,Ondiflo 结合区块链企业 ConsenSys 与石油产业领导者 Amalto,采用数字化手段记录下石油传输过程^[15]。生产商、精炼商、输送商等将各阶段的信息上传到区块链平台上,实现数据共享、可追溯,这使得供应链中的任何人都难以作假。同时 Ondiflo 尝试将油罐液位

计与运输工具的流量计连接来实现自动对账,将运输工具的电子记录设备集成至传输链的运营商处,以便时刻验证石油的位置、数量或质量。基于区块链的智能合约涉及到石油生产、运输至销售的各个环节,当传输链中出现任何数据不匹配的情况,会及时通知监管方采取措施。

2.4 绿色证书

为了应对气候变化、保护环境、节约资源,世界各国都在提倡使用可再生能源。出于环保意识,消费者愿意为绿色能源支付一定的溢价,然而电力用户无法获知其购买的电力来源,可再生能源发电商生产出的绿色电力需要经过多个机构认证才可获得绿色证书,认证成本较高,并且发出的电量与绿证核算的电量并不一定相等。针对这种情况,已有工程分别从发电侧和用电侧借助区块链技术进行改进。

在发电侧,以色列基于区块链技术和人工智能构建的微电网项目,利用区块链中信息不可篡改的特性记录下绿色电力的生产以及交易过程,同时借助智能合约给可再生能源发电商自动颁发绿色证书。

在用户侧,初创公司StromDAO借助区块链创建电力账户,制定指标来评估家庭用电中可再生能源电力所占比例,并根据该指标颁发相应的代币。

2.5 电动汽车充电权

随着能源转型的推进,电动汽车代替常规燃油汽车逐渐成为人们购买的主要出行工具。为了避免大量电动汽车负荷的接入使得电网过载,给系统安全运行带来冲击,同时保证输配电设备的安全运行电流不越限,需要考虑各种充电站的电量、功率等因素,对各充电站合理分配充电权,对充电桩进行优化配置。

德国的Share & Charge项目致力于构建一个基于区块链技术自主、共享的电动汽车充电平台。当电动汽车需要充电时,平台会兼顾私人充电桩以及商用充电站的充电意愿以及可提供的充电容量等因素为车主提供充电桩的候选项,车主则考虑距离远近以及电价等信息选择充电桩。充电过程中,区块链的分布式记账功能可以记录下充电过程,实现计费透明化、双方信任成本最小化。

通过该平台可以激励私家业主共享充电桩,提高充电桩的使用效率,解决充电难的问题。同时车主有序充电,降低了主网过载的可能性。总而言之,兼顾了电网、充电站以及车主的三方效益。

3 未来展望

分析区块链在能源领域的应用现状,可以发现两者结合仍存有大量挑战。一方面是由于对区块链的研究尚处于初期,区块链的广播、达成共识、打包信息需要花费大量时间,使得处理速度较慢。区块链平台与传统平台的接口该如何设计以保证信息不

受泄露的问题尚未得到解决。智能合约的算法实现的功能有限制,以交易平台为例,主要是依靠区块链进行电力交易结算,暂未考虑到电力系统的实际运行情况,例如过网费的设计、安全校核等实现。同时人工编写智能合约的过程中,不可避免地会因人为因素带来误差,为了减少偏差,需要将区块链与人工智能、大数据处理等新技术相结合。

另一方面是由于能源发展环境的约束,以我国的电力市场为例,能源企业存在行业寡头等问题,资源容易被少数企业垄断,使得区块链无法发挥出其去中心化的功能,甚至威胁到区块链的安全。针对这种情况,政府鼓励分布式能源发电,例如家庭屋顶光伏建设,满足小范围内的负荷需求、减轻主网对偏远地区用户的供电压力;同时配套实行可再生能源配额制以鼓励用户使用成本低、规模小、环保的分布式可再生能源电力,尽量实现电力就地消纳以避免长距离输电损失。

考虑到区块链在能源领域的发展建设现状,后续可以从以下几点进行研究。

3.1 提高能源交易效率

随着参与能源交易的主体数量迅速增多,区块链需要处理的数据也呈指数形式增长。而现有的交易处理速度仍然有限,一些区块链研究机构正在探究闪电网络、plasma等^[16]区块链结构对提高数据传输效率的贡献,目前在高频次、小额支付方面已经取得一定成效。接下来需要在区块链保证交易安全性与去中心化的基础上,进一步提高交易的处理速度。已有学者提出将对安全性能要求不高的交易步骤放至区块链下来处理,但目前链上链下交易的处理速度尚未匹配,如何匹配两者速率,以及链下与链上的接口如何传递信息,需要进一步地研究与讨论。

3.2 拓宽能源管理与控制方式

3.2.1 管理需求响应资源

随着分布式能源渗透率的提高,具有边际成本低、反应速度快等优势的需求响应资源^[17]可以经济、及时地平抑分布式能源出力的波动性。将区块链技术应用至需求侧资源交易中,有两个显著优点:一是区块链技术允许许多用户处于一个完全去中心化、不可信任的环境中,也就是分布式电力市场环境中,需求侧用户的具体交易信息不受访问的限制,保证了信息的透明性;二是针对需求侧用户不确定性的适应性,比如用户可以随时上线参与交易,在每个交易时段,当且仅当需求侧用户处于联网状态时才可以参与到合约制定过程中,这使得两个交易周期之间可调度资源的变化可以被及时掌握。

3.2.2 支持泛在电力物联网

随着国家电网2019年提出的建设发展泛在电力物联网,诸多能源企业着手研究能源与信息技术的结合,在发输配用多阶段安装数据收集、处理设备,

实现能源生产到使用的全过程管理与控制,并对智能设备的数据控制以及大规模信息联网等方面提供决策支持,借助智能合约实现设备之间的通信、自动配对以及命令的自动执行。例如到某一时刻自动充电、电量充满后自动断电等。对各种重要装置装设传感设备,将测量数据信息上传至区块链,从而及时报告安全隐患。

3.2.3 调控辅助服务

为了维持主网的稳定性,提高电能供应质量,与电网相连的灵活性资源可以在其空闲时为电网提供辅助服务。当电网出现波动时,运营商通过电价信号来激励灵活性资源提供备用等,从而将系统维持在一个稳定的范围内。区块链的记账功能,可以精确记录调用灵活性资源的次数、数量等信息,便于后期的自动结算。

3.3 改善信息交互模式

传统的能源交易需要有第三方对供应商与需求方进行匹配,即中心化管理,这种模式对外部攻击抵抗力低,一旦被攻破,不仅是参与多方的信息会被泄露,社会的用电也会受到巨大威胁,造成巨大的经济损失。而采用区块链的分布式架构可以减少运营商、售电商等在提供服务过程中内部人为因素的干扰,即使遭受外部攻击,也能够将损失降到最小。出于对经济性与安全性的考虑,无论是商品的交易过程还是公司企业管理的过程,都可以逐渐采用区块链的分布式架构,实现主体之间的任意对等通信。

4 结束语

区块链技术凭借其不可篡改、公开透明、安全等特性,已被成功应用至多种类型能源交易当中。鉴于区块链尚处于发展初期,其应用还存在一些短板,在我国基于区块链技术发展能源的过程中,需要借鉴国外发展经验,同时要结合国内发展现状,发挥分布式能源发电商在市场中的功效,实现能源领域的稳健发展。本文介绍了欧美国家典型的区块链能源应用,从电力行业出发,在大规模推广分布式能源发电技术的背景下,结合需求响应资源、泛在电力物联网等发展,针对我国现有政策以及能源利用情况给出了后续的发展建议,为我国在能源领域应用区块链技术提供参考。D

参考文献:

[1] 平健,陈思捷,张宁,等. 基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3 682-3 690.
PING Jian, CHEN Sijie, ZHANG Ning, et al. Decentralized transactive mechanism in distribution network based on smart contract[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37

(13):3 682-3 690.
[2] 任泳橙. 分布式光伏并网对配电网潮流和网损的影响及对策[J]. 供用电, 2017, 34(2):64-68.
REN Yongcheng. The impact and countermeasure of grid-connection of distributed PV on power flow and network loss of distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(2):64-68.
[3] 刘怡君,夏晨杰,关惠方,等. 电力市场下风电电力系统旋转备用风险-成本模型[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1):42-48.
LIU Yijun, XIA Chenjie, GUAN Huifang, et al. Risk-cost-model of spinning reserve of power system incorporated wind power in electricity market[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1):42-48.
[4] 高赐威,童格格. 区块链技术在分布式发电市场化交易中的应用分析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(4):1-4, 15.
GAO Ciwei, TONG Gege. Application analysis of blockchain technology in market-based transaction of distributed generation[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(4):1-4, 15.
[5] 袁勇,王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4):481-494.
YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: The state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4):481-494.
[6] 李彬,卢超,曹望璋,等. 基于区块链技术的自动需求响应系统应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3 691-3 702.
LI Bin, LU Chao, CAO Wangzhang, et al. A preliminary study of block chain based automated demand response system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13):3 691-3 702.
[7] 杨德昌,赵肖余,徐梓潇,等. 区块链在能源互联网中应用现状分析和前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13):3 664-3 671.
YANG Dechang, ZHAO Xiaoyu, XU Zixiao, et al. Developing status and prospect analysis of blockchain in energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13):3 664-3 671.
[8] ZHAO S, WANG B, LI Y, et al. Integrated energy transaction mechanisms based on blockchain technology[J]. Energies, 2018, 11(9):2 412.
[9] NOOR S, YANG W, GUO M, et al. Energy demand side management within micro-grid networks enhanced by blockchain[J]. Applied Energy, 2018(228):1 385-1 398.
[10] 邵雪,孙宏斌,郭庆来. 能源互联网区块链应用的交易效率分析[J]. 电网技术, 2017, 41(10):3 400-3 406.
TAI Xue, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Transaction efficiency analysis of blockchain applied to energy internet[J]. Power System Technology, 2017, 41(10):3 400-3 406.
[11] 国家发改委,国家能源局. 关于开展分布式发电市场化交易试点的通知[EB/OL]. (2017-10-31)[2018-12-31]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on the pilot of distributed generation market trading[EB/OL]. (2017-10-31)[2018-

- 12-31]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm.
- [12] MENGELKAMP E, JOHANNES G, ROCK K, et al. Designing microgrid energy markets: A case study: The brooklyn microgrid [J]. *Applied Energy*, 2018 (210): 870-880.
- [13] Power Ledger. 基于区块链的能源生态网络[EB/OL]. (2017-12-14) [2019-02-14]. <https://www.chainnode.com/post/109427>.
Power Ledger: a blockchain-based energy ecosystem[EB/OL]. (2017-12-14) [2019-02-14]. <https://www.chainnode.com/post/109427>.
- [14] Inzet Blockchain Technologie. Cgi en eneco ontwikkelen prototype voor handel in warmte[EB/OL]. (2019-01-04) [2019-03-14]. <https://www.cginederland.nl/nl/artikel-en/inzet-blockcha-in-technologie-cgi-en-eneco-ontwikkelen-prototype-vo-or-handel-in-warmte>.
- [15] Ondiflo. Blockchain for oil and gas[EB/OL]. (2018-10-23) [2019-03-14]. <https://media.consensys.net/ondiflo-blockchain-for-oil-and-gas-9de5e01cd680>.
- [16] STARK J. Making sense of ethereum's layer 2 scaling solutions: state channels, plasma, and truebit [EB/OL]. (2018-07-23) [2019-03-14]. <https://medium.com/l4-media/making-sense-of-ethereums-layer-2-scaling-solutions-state-channels-plasma-and-truebit-22cb40dcc2f4>.
- [17] 王蓓蓓,李扬,高赐威. 智能电网框架下的需求侧管理展望与思考[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(20): 17-22.
WANG Beibei, LI Yang, GAO Ciwei. Demand side management outlook under smart grid infrastructure[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(20): 17-22.
- (责任编辑 水 鹤)

(上接第87页)

剩余客户通过上门服务的方式进行推广。对预测结果为租户的358户客户,通过点对点消息推广预付费缴费模式145户,剩余213户通过上门服务推广,成功办理预付费缴费业务的共计98户,推广成功率为27.37%。对预测结果为非租户的642户客户,通过点对点消息推广预付费缴费模式260户,剩余382户通过上门服务推广,成功办理预付费缴费业务的共计21户,推广成功率为3.27%。可见,本文建立的模型能较准确地识别租户。

4 结束语

本文利用专家咨询法形成租户分析指标体系,并建立了基于逻辑回归法的租户识别模型,利用1500户数据对模型分类结果进行验证,结果表明模型分类效果较好。最后,向预测结果为租户和非租户的客户分别开展预付费交费模式推广,推广成功率差异较大,因此,本文建立的模型准确率较高,能为推广预付费模式提供支撑,帮助房主减轻违约风险,辅助提高电费回收率。■

参考文献:

- [1] 魏胜民,尹硕,赵璇,等. 基于售电市场成熟度和用户分级的差异化服务策略[J]. *电力需求侧管理*, 2018, 20(6): 46-49.
WEI Shengmin, YIN Shuo, ZHAO Xuan, et al. Differentiated service strategy based on electricity sales market maturity level and power customer value classification [J]. *Power Demand Side Management*, 2018, 20(6): 46-49.
- [2] 王庆娟,张维,吕诗宁. 出租房客户定位分析及电费回收策略[J]. *电力需求侧管理*, 2017, 19(6): 45-48.

- WANG Qingjuan, ZHANG Wei, LV Shining. Analysis of locating the rental housing customers and strategy of tariff charging [J]. *Power Demand Side Management*, 2017, 19(6): 45-48.
- [3] 赵晨,尹玉芬. 电力体制改革下工业用电客户差异化策略[J]. *电力与能源*, 2018, 3(5): 708-713.
ZHAO Chen, YIN Yufen. Differentiated management strategy of industrial customers under the reform of electric power system [J]. *Power & Energy*, 2018, 3(5): 708-713.
- [4] 耿俊成,张小斐,袁少光,等. 基于逻辑回归模型的电力客户停电敏感度评分卡研究与实现[J]. *电力需求侧管理*, 2018, 20(3): 46-50.
GENG Juncheng, ZHANG Xiaofei, YUAN Shaoguang, et al. Research and implementation of users' outage sensitivity score card based on logistic regression model [J]. *Power Demand Side Management*, 2018, 20(3): 46-50.
- [5] 卢辉. 数据挖掘与数据化运营实战[M]. 北京:机械工业出版社, 2016.
LU Hui. *Data mining, leading with data driven practice* [M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [6] AOIFE B H, MICHAEL G P. International benchmarking of electricity transmission by regulators: A contrast between theory and practice[J]. *Energy Policy*, 2013(62): 267-281.
- [7] 郑芒英. 用电客户停电敏感度分析[D]. 广州:华南理工大学, 2014.
ZHENG Mangying. Sensitivity analysis of electricity customer outage [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [8] 李航. 统计学习方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2012.
LI Hang. *Statistical learning method* [M]. Beijing: Tsinghua University Press. 2012.

作者简介:

李悦(1989),女,江苏连云港人,工程师,主要研究方向为电力营销服务、电子渠道服务运营。

(责任编辑 徐文红)